

光纤光栅啁啾化传感研究

郭 团 刘 波 张伟刚 开桂云 赵启大 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 提出了光纤光栅啁啾化传感概念和传感机理, 将光纤光栅微观分解为栅区长度范围的许多具有独立感知能力且彼此关联的有效作用子栅集, 表述了有效作用子栅集与待测环境场空间梯度分布之间的对应关系, 从而较好地解释了光纤光栅啁啾谱产生的内在机理。理论推导并实验验证了光栅啁啾谱各谱参量(波长、带宽和反射光强)与待测环境场(温度和应变)之间的对应关系, 为利用单一光纤光栅实现多参量同时区分测量、任意非均匀空间分布场传感提供了科学有效的解决方法。

关键词 导波与光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 啁啾化传感

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Research on Optical Fiber Grating Chirp-Sensing Technology

Guo Tuan Liu Bo Zhang Weigang Kai Guiyun Zhao Qida Dong Xiaoyi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract The concept and principle of optical fiber grating chirp-sensing technology are proposed. The spatially varying structure of the chirped fiber grating has been divided into several sections called the effective-interaction sub-regions. Each effective-interaction sub-region possesses an independent sensing ability and its relationship to the gradient distribution of environmental parameters has been formulated. The origin of the FBG chirping and its effect on the characteristics of the resultant reflection spectra (wavelength, bandwidth and total optical power) under the effect of the surrounding environment (spatial distributions of temperature and strain) have been theoretically explained and experimentally demonstrated. This provides the foundation of the FBG chirp-sensing technology and opens new avenues for its potential applications in simultaneous measurement of multiple parameters and also in the distributed measurement of nonuniform environmental parameters.

Key words guided-wave and fiber optics; fiber-optic sensing; optical fiber grating; chirp-sensing technology

1 引 言

随着近二十年来光纤光栅传感技术的高速发展, 人们对光纤光栅传感理论及相关应用已经取得了长足的进步^[1~3]。

传统光纤光栅传感技术基于波长编码和解调。此方法利用波分复用技术可实现单纤多栅准分布式传感, 在长距离、大面积、网络化传感领域发挥了重要作用。然而, 基于单一波长编码/解码的光纤光栅传感方法在针对诸如多参量同时区分测量、非均匀

场感测等实际应用中存在固有缺陷, 特别是对于小范围(光栅长度)待测场的高精度感测, 这一问题更为突出。其根源在于仅利用了光纤光栅反射谱的波长信息这一单一调制参量来解调多种待测参量。本文提出并系统阐述了光纤光栅啁啾化传感概念及其传感原理, 即通过有效调制和解调光纤光栅啁啾谱所携带的多种谱参量(波长、带宽、光强、相位等), 以解决上述传感难点。啁啾化传感方法(即分布式光纤光栅内传感)科学地从其自身栅格结构出发, 将光

收稿日期: 2007-08-22; **收到修改稿日期:** 2007-10-26

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z217)、国家 973 计划(2003CB314906)、国家自然科学基金(60572018, 10674075)和天津市科技发展计划(05YFGPG04900)资助课题。

作者简介: 郭 团(1979—), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事光纤通信与光纤传感理论与应用技术等方面的研究。

E-mail: guotuan2001@163.com

导师简介: 赵启大(1942—), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事声光信息处理、光纤通信与光纤传感技术等方面的研究。E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

光纤光栅微观量化为栅区长度范围内许多具有独立感知能力且彼此关联的有效作用子栅集,从而较好地解释了光纤光栅啁啾谱产生的内在机理,为光栅啁啾谱的有效调制与解调提供了理论依据。

2 基本原理

2.1 光纤光栅啁啾化传感概念

光纤光栅啁啾化传感理论已不再将光纤光栅的微观结构视为一个可忽略自身感测区域(栅区轴长与径宽)的点传感元,而是将其准确定义为一个在栅区长度范围内许多具有独立感知能力的连接紧密、彼此关联的有效作用子栅集。各有效作用子栅集并非特指单一光栅栅格,而是由对应子区域的多个连接栅格构成。各有效作用子栅集具有相对独立的感知能力,并通过自身子反射谱的波长漂移反映其对应位置环境场的变化信息。这样,一个完整的光纤光栅反射谱便成为各个不同位置的有效作用子栅集

所对应的各个子反射谱相互叠加、综合作用的结果。

当光纤光栅周围待测场(温度/应变)均匀分布时,光纤光栅各位置处的有效作用子栅集感测到相同的温度和应变变化,反射出相同波长的布拉格子反射谱,各个子反射谱在同一波长位置相互叠加,整个光纤光栅反射谱呈现出一个窄线宽、高峰值功率的布拉格非啁啾谱;当光纤光栅周围待测场(温度/应变)非均匀分布时,光纤光栅各位置处的有效作用子栅集感测到不同的温度和应变变化,对应反射出不同波长的布拉格子反射谱,各个子反射谱相互分离,整个光纤光栅反射谱则呈现出一个峰值功率下降但总反射光强增加的布拉格啁啾展宽谱。图 1 给出了在单调多级阶跃梯度应变场作用下光栅栅区各有效作用子栅集及其对应子反射谱。图 1 表明,各有效作用子栅集所处位置和长度与外界环境场分布一一对应,其子反射谱的波长漂移量和峰值功率正比于对应位置光栅应变大小和应变区域长度。

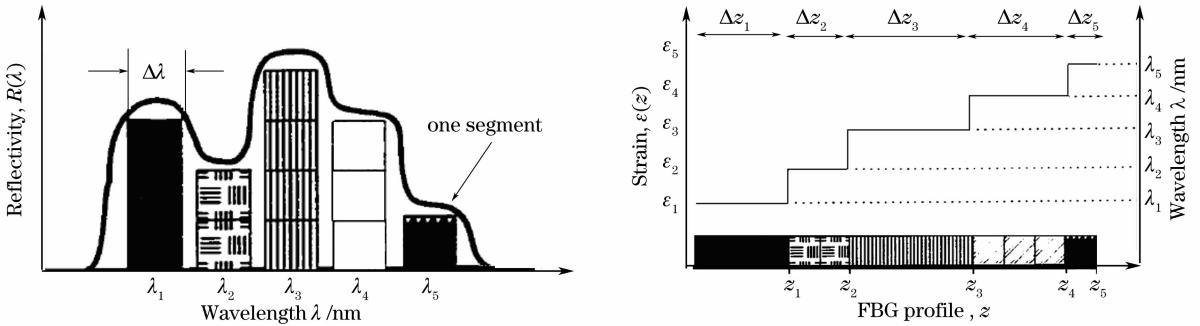


图 1 光纤光栅啁啾化传感概念示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber grating chirp-sensing

综上所述,在非均匀场感测中,光栅栅区各个位置反射的子谱波长取决于其所处位置外界场量大小,外界场在栅区的空间分布决定了光栅反射谱的谱形特性(波长、带宽、光强和相位等)。因此,光纤光栅啁啾谱客观如实地反映了光栅栅区待测场的空间分布,光纤光栅啁啾化传感为研究与感测非均匀场空间分布以及多参量同时区分测量提供了科学有效的解决办法^[4~16]。

2.2 有效作用子栅集

有效作用子栅集并非特指某一光栅栅格,而是由对应子区域相互连接的多个栅格构成。各有效作用子栅集具有相对独立的感知能力,并通过自身子反射谱的波长漂移反映其对应位置环境场的变化信息。

栅区内部各个位置处的有效作用子栅集长度取决于对应位置待测环境场的空间梯度分布。其表达

式为

$$l_{\text{eff},i} = \left[\Lambda_0 \left/ \left| \frac{d}{dz} f(z) \right|_{z=z_i} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中 $l_{\text{eff},i}$ 为栅区各个位置的有效作用子栅集长度(即光栅空间有效分辨力); $f(z) = \epsilon^{\text{opt}}(z) + T^{\text{opt}}(z)$ 为外界待测场的空间分布,包含光应变场 $\epsilon^{\text{opt}}(z)$ 和光温度场 $T^{\text{opt}}(z)$; z 为子栅集对应位置; Λ_0 为栅格初始长度。

(1) 式表明,有效作用子栅集长度 l_{eff} 取决于其对应位置处外界场 $f(z)$ 的梯度分布:当外界场梯度增大时,有效作用子栅集长度对应减小,光栅的空间有效分辨力相应提高;当外界场梯度减小时,有效作用子栅集长度对应增加,光栅的空间有效分辨力相应降低;当外界场梯度逐渐减小为零值时(即待测场空间均匀分布),各有效作用子栅集同趋势变化,光栅空间分辨力降至整个光纤光栅长度。

2.3 均匀/非均匀场光纤光栅的温度/应变响应机理

温度对光纤光栅的影响主要有两方面:一是热膨胀导致材料尺度变化,另一方面是热致折射率改变;轴向应变对光栅的影响表现在:一是使光栅栅距、光纤纤芯和包层半径变化,另一方面将通过弹光效应改变光纤的折射率。

1) 均匀场光纤光栅波长响应特性

对于一个栅矩间隔 Λ 一致、有效折射率 n_{eff} 周期性均匀分布的光纤布拉格光栅而言,其反射波长 λ_{B} 可表示为

$$\lambda_{\text{B}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

当应变场 ϵ 沿光纤轴向均匀施加到光栅区域且环境温度场 T 均匀变化时,光纤光栅反射谱仅波长漂移,谱形不发生改变。反射谱的波长漂移量 $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 可表示为^[2]

$$\Delta\lambda_{\text{B}} = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T], \quad (3)$$

式中 ϵ 为应变, ΔT 为温度变化量, $p_e = (n_{\text{eff}}^2/2) \times [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数(p_{ij} 和 ν 分别为光纤材料的弹光张量分量和泊松比系数), α 和 ξ 分别为光纤材料的热膨胀系数和热光系数。

2) 非均匀场光纤光栅波长响应特性

当非均匀应变场 $\epsilon(z)$ 和温度场 $T(z)$ 作用于光纤光栅时,光栅栅区各个位置的栅格将对应发生非均匀伸缩,光栅栅区的折射率分布也相应改变。栅格分布 $\Lambda(z)$ 和折射率分布 $n(z)$ 分别表示为^[4]

$$\Lambda(z) = \Lambda_0[1 + \epsilon(z) + \alpha T(z)], \quad (4)$$

$$n(z) = n_0 + \delta n^{\text{perm}}(z) + \delta n^{\epsilon}(z) + \delta n^T(z), \quad (5)$$

其中, Λ_0 和 n_0 分别为光栅初始栅距间隔和初始有效折射率; $\delta n^{\text{perm}}(z)$ 为光栅固有折射率调制; $\delta n^{\epsilon}(z)$ 和 $\delta n^T(z)$ 分别为应变和温度对光纤光栅折射率的空间调制度。

这样,光栅栅区各位置反射得到的波长 $\lambda(z)$ 可表示为

$$\lambda(z) = 2n(z)\Lambda(z) = 2n_0\Lambda_0[1 + e^{\text{opt}}(z) + T^{\text{opt}}(z)], \quad (6)$$

其中,定义光应变参量

$$e^{\text{opt}}(z) = \epsilon(z) + \delta n^{\text{perm}}(z)/n_0 + \delta n^{\epsilon}(z)/n_0,$$

包括光纤自身应变以及应变引起的折射率调制;光温度参量为 $T^{\text{opt}}(z) = \alpha + \delta n^T(z)/n_0$, 包括光纤热膨胀系数以及温变引起的折射率调制。通常, α 被衬底热膨胀系数 α_{sub} 取代。

3) 非均匀场光纤光栅带宽响应特性

由于光纤光栅周围温度、应变场的非均匀分布,

栅区各个位置处的栅格(如栅格周期 Λ 和折射率调制度 Δn) 将随环境空间场的非均匀分布而发生不一致改变,因此各有效作用子栅集将反射出不同波长的子反射谱。由于各子反射谱间距相对于其带宽较小,子谱间大部分重叠,最终形成了一个谱形整体展宽的啁啾反射谱。啁啾谱的带宽展宽量 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 可表示为最大谐振波长 λ_{max} 与最小谐振波长 λ_{min} 之差^[5], 即

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{BW}} &= \lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}} = \\ &2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}) + \\ &(\alpha + \xi)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})] = \\ &2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\Delta\epsilon_{\text{grad}} + (\alpha + \xi)\Delta T_{\text{grad}}], \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\Delta\epsilon_{\text{grad}} = \epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}}$ 与 $\Delta T_{\text{grad}} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ 分别表示光栅栅区的最大应变梯度和最大温度梯度。(7)式表明,在单调梯度环境场作用下,且环境场梯度变化不剧烈的前提下(忽略了温度/应变的交叉敏感项及高阶项),光纤光栅反射谱带宽展宽量可近似地认为线性正比于光栅栅区最大温度梯度和应变梯度。

4) 非均匀场光纤光栅反射光强响应特性

随着光栅反射谱的展宽,反射光强将随之增加^[6]。反射谱光强增加量 ΔP 与对应带宽变化 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 之间的关系为

$$\Delta P = k\alpha_{\text{loss}}^2 RP_{\text{BBS}}(\lambda)\Delta\lambda_{\text{BW}}, \quad (8)$$

式中 k 和 α_{loss}^2 分别为器件连接的光强耦合系数和光纤传输损耗, R 为光栅反射率, $P_{\text{BBS}}(\lambda)$ 为宽带光源的输出谱密度。

将(7)式代入(8)式,则光栅啁啾谱反射光强与非均匀应变/温度梯度场之间的关系可表示为

$$\Delta P = 2k\alpha_{\text{loss}}^2 RP_{\text{BBS}}(\lambda)n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\Delta\epsilon_{\text{grad}} + (\alpha + \xi)\Delta T_{\text{grad}}], \quad (9)$$

(9)式表明,光栅啁啾谱反射光强正比于栅区最大应变/温度梯度。实验表明,反射谱展宽过程中,谱峰值功率 $P_{\text{BBS}}(\lambda)$ 略有下降,总反射光强增加。

3 非均匀场啁啾谱数值模拟与分析

依据上述非均匀场光纤光栅啁啾谱理论分析,数值模拟光纤光栅在不同类型非均匀应变/温度场作用下啁啾谱的响应特性,直观地给出谱形啁啾变化与待测场空间分布的对应关系,为分析在实际测量过程中得到的各种啁啾谱的成因提供直观的理论参照。

光纤光栅数值模型的初始参量如下:中心反射波长为 1550 nm,栅区长度为 15 mm,栅距为 0.5×10^{-3} mm;有效作用子栅集长度为 3×10^{-1} mm(即整个栅区含有 50 个有效作用子栅集);纤芯有效折

射率为 1.458;纤芯折射率调制深度为 1.0×10^{-4} 。

3.1 非均匀应变场啾啾谱数值模拟

在温度场恒定的前提下,数值模拟光纤光栅在 线性、二阶、高斯梯度应变场作用下光栅啾啾谱的 谱形特征。

光纤光栅轴向非均匀应变场 $\epsilon(z)$ 可表示为

$$\epsilon(z) = \epsilon_0 + g_\epsilon(z) \times z, \quad (10)$$

式中 ϵ_0 为初始应变, $g_\epsilon(z) = d\epsilon^{opt}(z)/dz$ 为应变梯 度系数。设初始应变 ϵ_0 为零,图 2 分别给出了线性梯 度应变场 $g_\epsilon(z) = az$ 、二阶梯度应变场 $g_\epsilon(z) = az^2$ 、高斯梯度应变场 $g_\epsilon(z) = a \exp(-z^2/b)$ 啾啾谱 的谱形变化趋势。

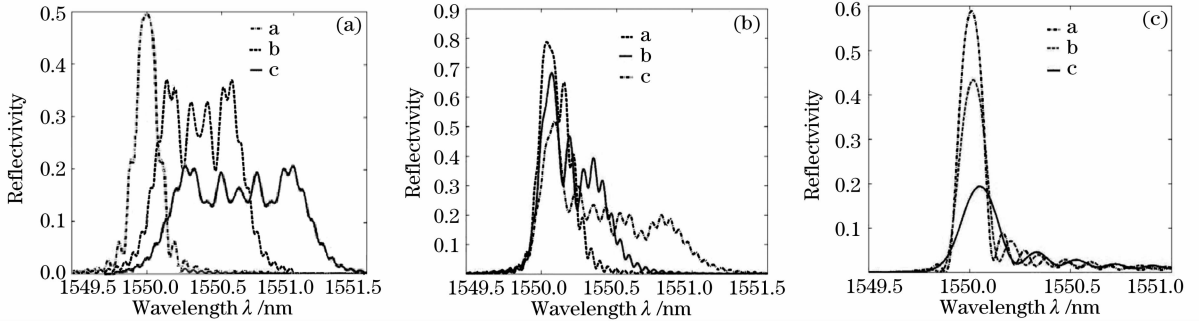


图 2 线性梯度应变场(a), 二阶梯度应变场(b), 高斯梯度应变场(c)光栅啾啾谱

Fig. 2 Grating chirped spectra of linear gradient strain field (a), quadratic gradient strain field (b), Gaussian gradient strain field (c)

3.2 非均匀温度场啾啾谱数值模拟

在应变场恒定的前提下,数值模拟光纤光栅在 上述典型非均匀温度场作用下光纤光栅啾啾谱的 谱形特征。

光纤光栅环境非均匀温度场 $T(z)$ 可表示为

式中 T_0 为初始温度, $g_T(z) = dT^{opt}(z)/dz$ 为温度梯 度系数。设初始温度 T_0 为零,图 3 分别给出了线性 梯度温度场 $g_T(z) = az$ 、二阶梯度温度场 $g_T(z) = az^2$ 、高斯梯度温度场 $g_T(z) = a \exp(-z^2/b)$ 啾啾谱 的谱形变化趋势。

$$T(z) = T_0 + g_T(z) \times z, \quad (11)$$

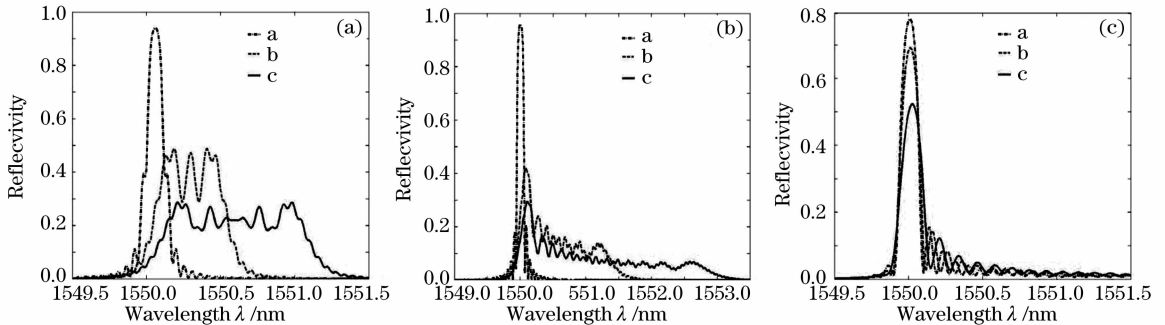


图 3 线性梯度温度场(a), 二阶梯度温度场(b), 高斯梯度温度场(c)光栅啾啾谱

Fig. 3 Grating chirped spectra of linear gradient temperature field (a), quadratic gradient temperature field (b), Gaussian gradient temperature field (c)

4 啾啾化传感应用实例

基于上述非均匀场光纤光栅(FBG)啾啾化传感 理论,本节通过自行设计的双孔梁结构,实验验证啾 啾化传感原理在实际应用中的可行性。

双孔梁为中心对称结构,由弹性钢制成,其结构 如图 4 所示。光纤布拉格光栅粘贴于梁左侧孔上 方平面的非均匀梯度应变区,待测压力分别沿双孔 梁中轴线(梁底部固定)和右侧边沿(梁左边沿固 定)垂直施加。

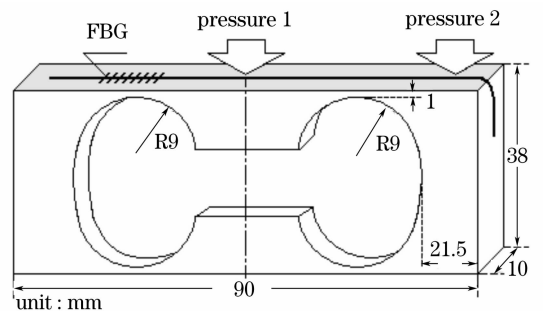


图 4 双孔梁传感系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of double-hole beam sensing system

4.1 线性梯度应变场啁啾化传感

基于有限元方法分析,图 5(a),图 5(b)分别给出了在中心压力和基底固定的边界条件下,双孔梁剖面应力分布和梁上平面沿光纤轴向的应变分布曲线。其中,光栅粘贴区域由点划线标出。由图 5(b)可知,双孔梁上表面应变为对称分布,光栅粘贴于以左弓梁弧顶正上方零应变点(点 c)为中心的最大线性应变区(点 a 和点 b 之间)。压力作用下,光纤光栅以 c 点为临界点,左侧栅区感受拉应变,对应反射波长向长波方向漂移,右侧栅区感受压应变,对应反射波长向短波方向漂移。因此,压力作用下的光栅展宽谱呈现中心波长恒定,波形对称展宽的变化趋势。由于光栅左右两侧均部分超出了应变拐点 a 和 b,超出部分的栅格重叠反射同应变下光谱,因此反射谱两侧均出现一个反射次峰。压力实验谱与上述分析吻合,如图 6 插图所示。对于空间均匀分布的温度场,由同一材料制成双孔梁各个位置的热膨胀系数相同,且光栅基底梁表面平整,温度变化引起的栅区各位置栅格应变相同。因此,温度变化仅引起反射谱波长漂移,而反射谱谱形不变。实验结果与上述分析吻合,如图 6 所示。图 7 给出了光纤光栅啁啾谱在中心压力作用下的温度和压力响应曲线,该装置可实现基于中心波长和谐宽编码/解调的温

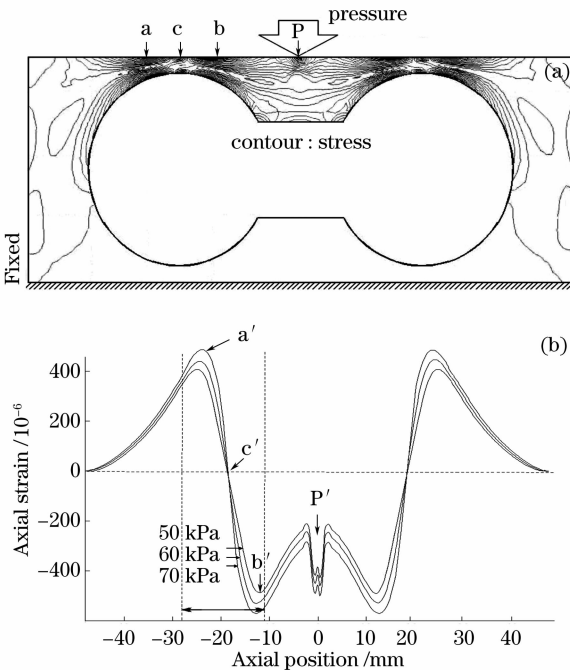


图 5 双孔梁剖面应力分布和上表面轴向应变分布(中心下压)

Fig. 5 Stress and strain distribution of the double-hole cantilever beam (under centre-applied pressure)

度/压力同时区分测量。与此同时,通过主动压力控制,此装置可实现中心波长无漂移、反射谱对称展宽的谱宽调制;通过主动温度控制,光栅展宽谱中心波长可根据需要进行不同波段的动态调制。因此,光栅反射谱带宽和中心波长的压力/温度独立调制在此双孔梁性能测试中得到较好的实现,这一技术在光纤通信领域中的可调色补偿和可调带通滤波方面也具有一定的应用潜力。

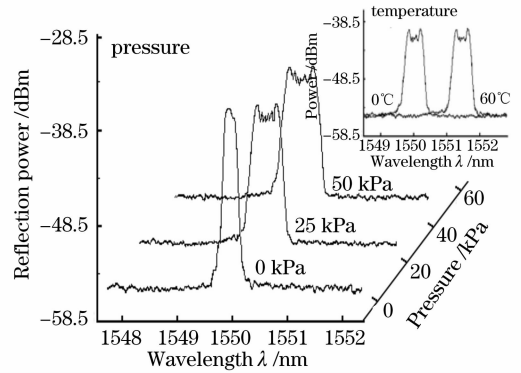


图 6 光纤光栅响应系列啁啾谱(中心压力,温度固定于 20 °C)

Fig. 6 Fiber Bragg grating chirped spectra at different central pressure at a fixed temperature of 20 °C

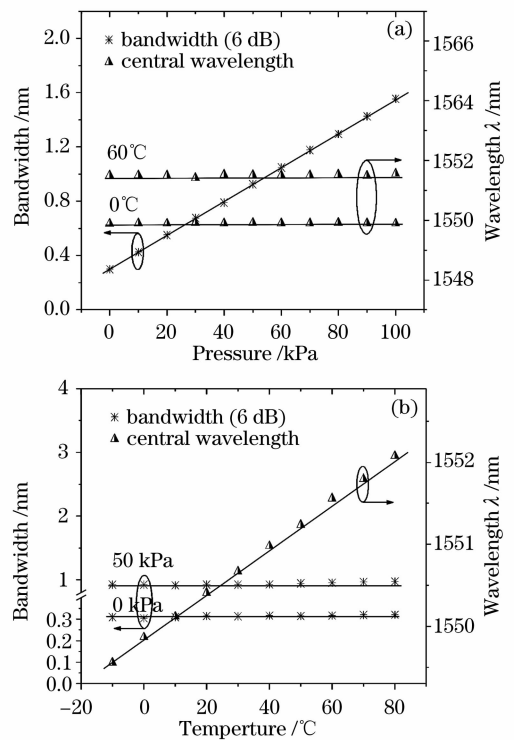


图 7 光纤光栅啁啾谱的温度和压力响应曲线(中心压力)
Fig. 7 Characteristics of fiber Bragg grating chirped spectra to temperature and pressure (under centre-applied pressure)

4.2 高斯梯度应变场啾啾化传感

同上述有限元分析,图 8(a),图 8(b)分别给出了在右侧压力和左侧固定的边界条件下,双孔梁剖面应力分布和梁上平面沿光纤轴向的应变分布曲线。由图 8(b)可知,光栅粘贴区为高斯梯度分布,以左弓梁弧顶正上方最大应变点(点 c)为中心的向两侧依次递减(点 a 和点 b 之间),带动光栅相应位置栅距伸长量以同样的趋势变化,各区域栅格反射波长不同,从而得到波长位置不同的一系列布拉格反射峰,由于各反射峰间距相对于其反射谱带宽较

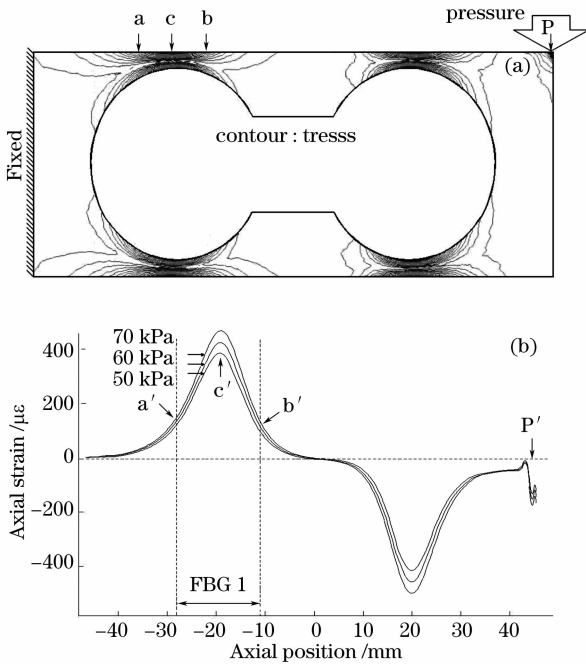


图 8 双孔梁剖面应力分布和上表面轴向应变分布 (右侧下压)

Fig. 8 Stress and strain distribution of the double-hole cantilever beam (under side-applied pressure)

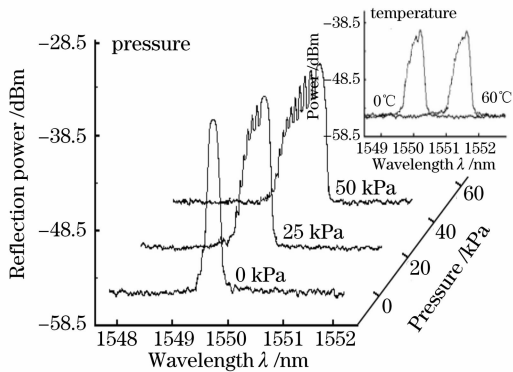


图 9 光纤光栅响应系列啾啾谱(单侧压力, 温度固定于 20 °C)

Fig. 9 Fiber Bragg grating spectra versus side pressure at a fixed temperature of 20 °C

小,波与波之间大部分重叠,因此形成了一个整体展宽的布拉格反射谱。高斯应变分布使光强集中反射于光栅中心位置,对应的反射波长漂移最大,因此,展宽光谱呈现出外高内低、单侧递减分布状。图 9 给出了实验得到的侧压作用(温度恒定)以及温度变化(压力恒定)的光栅啾啾谱的变化。图 10 给出了对应响应曲线。响应曲线表明,此装置可应用于基于光强探测型的温变不敏感压力传感。

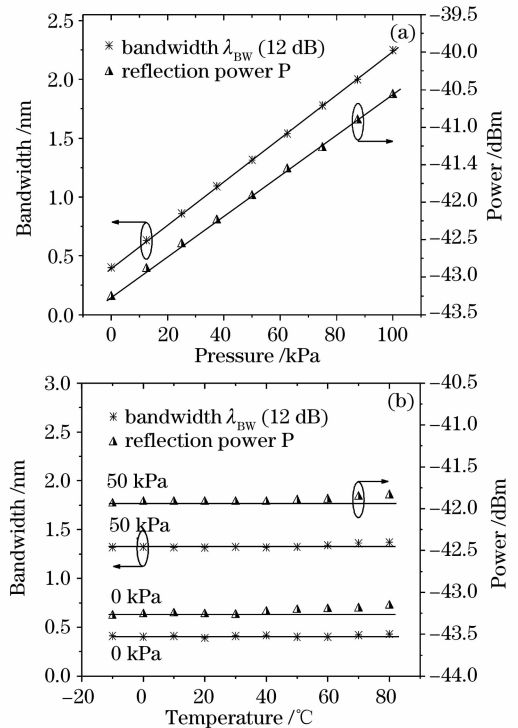


图 10 光纤光栅啾啾谱的温度和压力响应曲线 (单侧压力)

Fig. 10 Characteristics of fiber Bragg grating chirped spectra to temperature and pressure (under side-applied pressure)

5 结 论

啾啾化光纤光栅传感理论尚不成熟,其在非均匀场传感和单栅多参量区分测量等领域的应用仍需进一步研究。例如,在非均匀场传感中,基于带宽与光强编码/解调的啾啾化传感技术仅适合于单调待测场的感测;对于任意非均匀外界场(非单调)传感,必须引入啾啾谱的相位信息,相干检测法是提取相位信息的重要途径之一^[8]。因此,光栅啾啾谱的强度信息和相位信息的有效提取与综合分析,是进一步解决任意非均匀场感测的关键。基于不同光波导理论,全面分析啾啾化光纤光栅的光学特性,进而科学地把握其特殊传感机理,发挥光栅啾啾谱多种信

息承载特性,设计和制造各种结构新颖、功能各异的光纤光栅啾啾化传感器件,以丰富和发展现代光纤传感技术。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 2 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 3 Y. J. Yao. In-fiber Bragg grating sensors[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**(4): 355~375
- 4 M. M. Ohn. Fiber Bragg-intra grating measurement and control and their application to sensing and telecommunications[D]. Toronto: PhD Dissertation of Toronto University, 1997. 58~74
- 5 T. Guo, Q. D. Zhao, H. Zhang *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating force sensor via a bandwidth modulation and optical-power detection technique[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(10): 3797~3802
- 6 T. Guo, Q. D. Zhao, H. Zhang *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensing system[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(15): 2269~2271
- 7 S. Huang, M. M. Ohn, M. LeBlanc *et al.*. Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings[J]. *Smart Mater. Struct.*, 1998, **7**(2): 248~256
- 8 S. Huang, M. M. Ohn, R. M. Measures. Phase-based Bragg intragrating distributed strain sensor[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1135~1142
- 9 O. Frazao, R. Romero, F. M. Araujo. Strain-temperature discrimination using a step spectrum profile fibre Bragg grating arrangement[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **120**(2): 490~493
- 10 P. L. Fuhr, S. J. Spammer, Y. N. Zhu. A novel signal demodulation technique for chirped Bragg grating strain sensors[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2000, **9**(1): 85~94
- 11 J. L. Cruz, L. Dong, S. Barcelos *et al.*. Fiber Bragg gratings with various chirp profiles made in etched tapers[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6781~6787
- 12 V. Lien, Y. Wu, D. Y. Zhang *et al.*. A novel technology for fabricating gratings of any chirp characteristics by design[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 712~714
- 13 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Chen Jianjun *et al.*. A novel high sensitivity chirp tuning device of fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1153~1156
涂勤昌,张伟刚,陈建军等.一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1153~1156
- 14 Xue Lifang, Liu Jianguo, Zhao Qida *et al.*. A novel independent tuning method of center wavelength and bandwidth of fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 596~600
薛力芳,刘建国,赵启大等.一种新型光纤光栅波长与带宽独立调谐的方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 596~600
- 15 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Research on band width-modulated and temperature-independent single fiber Bragg grating displacement sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 15~20
郭 团,赵启大,刘丽辉等.带宽调制型单光纤光栅温变无补偿位移传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 15~20
- 16 M. LeBlanc, S. Y. Huang, M. Ohn *et al.*. Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1405~1407